

## **NIEKTÓRE WSKAŹNIKI PROCESÓW WZAJEMNEGO ODDZIAŁYWANIA PROMIENIOWANIA LASEROWEGO Z MATERIAŁAMI**

Agnieszka J. KLEMM\*, Kazimierz ROŻNIAKOWSKI\*\*

\* *School of Built and Nature Environment  
Glasgow Caledonian University,  
70 Coweaddens Road, Glasgow G4 0BA, UK*

\*\* *Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki  
ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: kazimierz.rozniakowski@p.lodz.pl*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań oddziaływania wiązki światła lasera z wybranymi materiałami stosowanymi w budownictwie. Zaobserwowane zjawiska mogą być czynnikiem charakteryzującym proces wzajemnego oddziaływania światła z wybranymi materiałami. Ponadto, te zjawiska mogą być przydatne do wyznaczania własności fizycznych tych materiałów. Mogą zatem stanowić wskaźniki charakteryzujące te zjawiska.

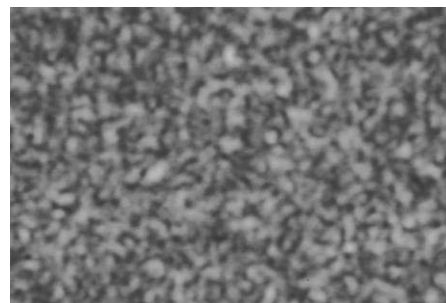
**Słowa kluczowe:** wiązka światła lasera, wzajemne oddziaływanie z materiałami, wskaźniki.

### **1. WPROWADZENIE**

Lasery i ich zastosowania w badaniach poznawczych i technologicznych związane są głównie z tym, że elektromagnetyczne promieniowanie emitowane przez nie, charakteryzuje się niezwykłymi właściwościami, różnymi od źródeł konwencjonalnych. Są to: duże natężenie promieniowania, mała rozbieżność wiązki, duży stopień monochromatyczności i spójności. Właściwości te są przyczyną powstawania wielu zjawisk, występujących przy wzajemnym oddziaływaniu wiązki laserowej i materiałów, prowadzących często do sprzężenia zwrotnego między nimi. Zjawiska te są podstawą laserowej, modyfikacji i metrologii właściwości fizycznych szerokiej klasy materiałów, generowanych przez współczesną inżynierię materiałową, stosowanych w różnych dziedzinach życia. Obecnie uważa się, że te zjawiska oraz skutki wzajemnego oddziaływania mogą być traktowane jako wskaźniki w laserowej inżynierii warstwy wierzchniej materiałów budowlanych [1-4].

### **2. LASEROWE SPECKLE - WSKAŹNIK CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI**

Określenie zależności, między parametrami chropowatej powierzchni i parametrami pola odbitej fali elektromagnetycznej (natężenie światła odbitego, rozproszonego, indykatrysa), jest podstawowym zadaniem teorii, opisującej odbicie i rozproszenie promieniowania elektromagnetycznego przez chropowatą powierzchnię, w wyniku dyfrakcji fal na mikronierównościach powierzchni. Najbardziej ogólnym i ważnym, z praktycznego punktu widzenia, jest taki model powierzchni, w którym parametry chropowatości traktowane są jako proces losowy. Wtedy rozwiązanie tego zagadnienia sprowadza się do znalezienia losowych charakterystyk rozproszonego pola fali elektromagnetycznej. Wskaźnikiem tego zjawiska mogą być powstające w nim laserowe speckle (rys.1).



Rys.1. Fotografia laserowych speckli.  
Fig. 1. Photography of the laser speckles

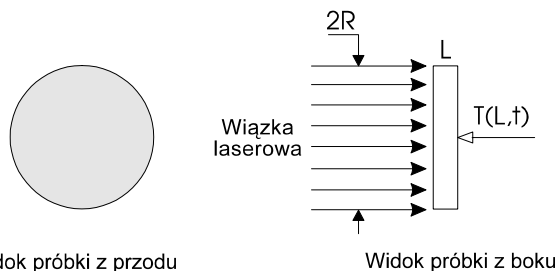
### 3. DYFUZYJNOŚĆ CIEPLNA – WSKAŹNIK WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNYCH MATERIAŁÓW (LFM)

W ogólności proces redystrybucji pochłoniętego przez materię laserowego promieniowania, z zakresu optycznego, jest bardzo złożony. W metalach opisywany jest on w oparciu o klasyczny model elektronów swobodnych, według którego strumień świetlny z wyjątkiem części odbitej jest całkowicie absorbowany przez elektrony przewodnictwa w warstwie o grubości około  $10^{-6}$  m. Już w czasie znacznie krótszym niż czas trwania, stosowanego w tych badaniach, laserowego impulsu (nawet uwzględniając spike's) różnica temperatur gazu elektronowego i siatki zmniejsza się dążąc do pewnej stałej wartości nazywanej temperaturą metalu. Zatem uważa się, że w skali czasu rzędu czasu trwania laserowego impulsu (nie trwającego krócej niż kilka nanosekund) energia świetlna jest natychmiast zmieniana w energię cieplną, w tym miejscu gdzie światło zostało pochłonięte.

Ten specyficzny, niekonwencjonalny sposób wytwarzania w metalach (lub w innych materiałach) powierzchniowego źródła ciepła jest wykorzystywany w Laserowej Metodzie Impulsowej (Laser Flash Method, LFM) do badania właściwości termofizycznych zarówno dobrych przewodników ciepła, jak i materiałów termoizolacyjnych (w tym, porowatych materiałów stosowanych w budownictwie). W tej metodzie dyfuzyjność cieplną wyznacza się ze wzoru [1]:

$$\alpha = \frac{1.38L^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (1)$$

gdzie:  $L$  – jest grubością próbki, a  $t_{1/2}$  jest czasem koniecznym do tego, aby tylna powierzchnia próbki osiągnęła połowę maksymalnego przyrostu temperatury. Geometrię eksperymentu w tej metodzie przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Geometria eksperymentu w LFM  
Fig. 2. Experimental set-up in LFM

### 4. EFEKTYWNY WSPÓŁCZYNNIK ODBICIA - WSKAŹNIK STRUKTURALNYCH PRZEMIAN FAZOWYCH

Obecnie jednym z najbardziej perspektywicznych sposobów obróbki metali i ich stopów jest wykorzystanie termicznych procesów laserowych.

W związku z tendencją (daje się ją zauważyć w ciągu ostatnich lat) specjalistycznego stosowania laserów w technologii, dużego znaczenia nabiera problem optymalizacji sposobów pracy urządzeń laserowych stosowanych w konkretnych operacjach (w systemie "on line"). Wybór optymalnych parametrów pracy takich urządzeń pozwala z maksymalną efektywnością wykorzystać ich możliwości, a także obniżyć koszty obróbki w warunkach przemysłowych.

Stąd też problemowi wyznaczania współczynników odbicia  $R$  i pochłaniania  $A$  poświęcono wiele prac doświadczalnych i teoretycznych. Mimo to zagadnienie nie jest całkowicie zbadane i wyjaśnione. Oczywiście więc jest, że problem ten ma także duże znaczenie poznawcze, a otrzymane wyniki badań w tej dziedzinie mogą służyć również optymalizacji parametrów pracy urządzeń laserowych, w konkretnych operacjach technologicznych. W literaturze problemu, trudno znaleźć prace (mimo poszukiwania ich w wielu światowych bazach komputerowych), w których do wyznaczania efektywnego współczynnika odbicia  $R$  wykorzystywano by zjawiska przemian fazowych zachodzących w materiale pod wpływem impulsowego nagrzewania laserowego.

Między gęstością mocy  $Q_2$  promieniowania kierowanego na próbkę i zaabsorbowanego przez nią ( $Q$ ) istnieje związek [1]:

$$Q = (1 - R)Q_2 \quad (2)$$

gdzie:  $R$  jest efektywnym współczynnikiem odbicia promieniowania od powierzchni materiału.

Współczynnik odbicia  $R$  można przedstawić w postaci:

$$R = 1 - \frac{T_h K}{2Q_2 \sqrt{\alpha}} \left[ \sqrt{t} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z_h}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \sqrt{t - \tau_i} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z_h}{2\sqrt{\alpha(t - \tau_i)}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

Równanie (3) można wykorzystać do oszacowania  $R$  jeśli dla danego materiału znana jest temperatura przemiany fazowej  $T_h$  (na przykład martenzytycznej - kobalt, hartowania - stali 45). Na podstawie przekroju metalograficznego można zmierzyć  $z_h$ . Wartość natomiast  $t = t_h = \tau_i + \Delta t$  jest równe sumie czasu trwania  $\tau_i$  laserowego impulsu oraz czasu  $\Delta t$ , który można oszacować numerycznie.

### 5. WSPÓŁCZYNNIK DYFUZJI – WSKAŹNIK NAGRZEWANIA UKŁADU CIENKA WARSTWA-PODŁOŻE (DOMIESZKOWANIE)

Laserowo indukowany transport masy w fazie stałej, w złączu dyfuzyjnym, można wykorzystać do wyznaczenia współczynnika dyfuzji  $D$  atomów warstwy w podłoże, a także ich energii aktywacji  $E_D$ . Ponieważ, w odróżnieniu od metod klasycznych, impulsowa wiązka laserowa ( $\tau$  rzędu ms) nie wprowadza stałego, niezależnego od czasu i głębokości nagrzewania, to koniecznym staje się określenie występujących podczas eksperymentu warun-

ków termicznych (historii i gradientów temperatury). Powstające przy takim nagrzewaniu w powierzchniowych warstwach gradienty temperatur (rzędu  $4 \cdot 10^6$  K/m) wymagają być może uwzględnienia zjawisk termodyfuzji i generacji defektów struktury.

Lasery modyfikowanie warstwy wierzchniej materiałów poprzez wprowadzanie w nie domieszki jest szczególnie efektywną metodą otrzymywania wierzchnich warstw tych materiałów o określonych, oczekiwanych właściwościach. W szczególności poprawiane są ich charakterystyki mechaniczne i antykorozyjne. Można zatem stwierdzić, że aby otrzymać warstwy o żądanych właściwościach należy wykorzystać jako źródła promieniowania lasery o różnych parametrach, wprowadzając w materiał bazy odpowiednie materiały domieszkujące, na przykład węgiel tantalowy. Zmianę koncentracji tego węgla w warstwie cegły przedstawiono w Tabelach 1 i 2 [3].

Tabela 1. Koncentracja składników w warstwie wierzchniej czystej cegły.

Table 1. Concentration of elements in the surface layer of clean brick.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	57.81	71.83
Mg	ED	0.65	0.53
AlK	ED	6.22	4.58
SiK	ED	28.72	20.33
KK	ED	1.91	0.97
CaK	ED	0.47	0.23
TiK	ED	0.37	0.16
FeK	ED	3.85	1.37
<b>TOTAL</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

Tabela 2. Koncentracja składników w warstwie wierzchniej cegły domieszkowanej TaC.

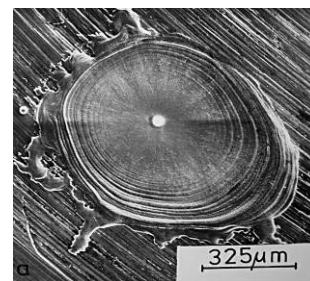
Table 2. Concentration of elements in the surface layer of brick doped TaC.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	55.96	71.44
Mg	ED	0.59	0.50
AlK	ED	6.16	4.66
SiK	ED	27.86	20.26
KK	ED	1.86	0.97
CaK	ED	0.54	0.27
TiK	ED	0.34	0.15
FeK	ED	3.92	1.43
TaL	ED	2.77	0.31
<b>TOTAL</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

## 6. FALE KAPILARNE – WSKAŹNIK SPRĘŻENIA ZWROTNEGO LASER- STOPIONA POWIERZCHNIA METALU

W wielu badaniach, a także zastosowaniach technologicznych, impulsowa wiązka promieniowania lasera, jest zwykle skupiana, za pomocą soczewek sferycznych lub cylindrycznych (lub układu zbudowanego z tego typu soczewek), w warstwie wierzchniej badanego (obrabianego) obiektu. Ponadto, często tak trzeba dobrać gęstość mocy, pochłoniętą w wierzchniej warstwie materiału (metal, stop), by warstwa ta uległa stopieniu (bez wymywania i gwałtownego parowania, a następnie szybkiemu zastygnięciu (stwardnięciu). Tak wytworzony obszar nazywany jest kraterem, kałużą lub wanną ciekłego metalu, stopu. Zachodzą w nim złożone procesy fizyczne, zarówno w czasie działania laserowego impulsu jak i po jego wyłączeniu. Ich badania podczas działania laserowego impulsu są ekstremalnie skomplikowane (nieraz wręcz niemożliwe) i kosztowne. Stąd też w opublikowanych dotąd badaniach problemu zdecydowanie przeważa liczba prac dotyczących analizy reliefu "zamrożonej" gwałtownie powierzchni i właściwości zmodyfikowanej warstwy wierzchniej, to znaczy prac, w których analizowane są skutki oddziaływania laserowego promieniowania z materiałem. Na ich podstawie wnioskuje się o zjawiskach dynamicznych, które mogły zachodzić w wannie ciekłego metalu, podczas działania laserowego impulsu oraz w czasie jej stygnięcia (stwardnięcia). Wnioskuje się także o procesach sprężenia zwrotnego, zachodzących między laserowym promieniowaniem a badanym obiektem.

Z wnikliwych i pracochłonnych badań mikroskopowych (optycznych i elektronowych SEM) reliefu powierzchni krateru wynika, iż ulega ona często dystorsji oraz osiowo-symetrycznemu pofalowaniu, nazywanemu falami kapilarnymi bądź pierścieniowymi, a także pierścieniowymi strukturalnymi lub strukturami (rys.3).



Rys.3. Fotografia fal kapilarnych

Fig. 3. Photography of the capillary waves

## 7. LASEROWA ABLACJA – WSKAŹNIK LASEROWEGO CZYSZCZENIA

W procesie czyszczenia warstwy wierzchniej za pomocą promieniowania laserowego, w odrywaniu cząstek zanieczyszczenia wykorzystywane jest zjawisko ablacji. Zjawisko to polega na odcięciu, stopniowym niszczeniu, kruszeniu się warstwy wierzchniej na skutek różnych czynników zewnętrznych. W procesie czyszczenia powierzchni impulsowym strumieniem fotonów, ablacja oznacza gwałtowne odparowanie zanieczyszczających cząsteczek w bardzo krótkim czasie.

W celu pokonania ogromnych sił przylegania cząsteczek zanieczyszczenia do powierzchni, bez uszkodzenia podłoża stosuje się czyszczenie wiązką laserową o takich parametrach aby wystąpiło zjawisko laserowej ablacji. W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w zanieczyszczonej warstwie wierzchniej pojawia się jako jej skutek, silny i gwałtowny wzrost temperatury - powstaje plazma (rys.4). Transport energii z plazmy, w wyniku konwekcji elektronowego przewodnictwa ciepła, odbywa się do wnętrza materiału, gdzie promieniowanie laserowe już nie dociera oraz w kierunku przeciwnym. powstaje granica nazywana frontem ablacji, na której występują silne gradienty gęstości i temperatury plazmy. Front ablacji oddziela więc dwa obszary, w których kierunki ruchu materii są przeciwne. Z obszaru bliższego zewnętrznej powierzchni następuje odparowanie, czyli ucieczka nagrzanego materiału w kierunku lasera i prostopadle do oświetlanej powierzchni. W obszarze drugim ruch materii jest skierowany w głąb podłoża. Powstaje tu wąski obszar słabo podgrzanej materii ściśnionej przez falę uderzeniową, która jest reakcją układu na bardzo szybkie odparowanie materii z powierzchni. Jeśli nawarstwienia (zanieczyszczenia) są bardzo cienkie, to fala uderzeniowa po odbiciu się od granicy międzyfazowej zmienia kierunek propagacji potęgując efekt wyrzucania cząsteczek zanieczyszczenia. Gdy natomiast usuwana warstwa jest gruba, wystąpi przejście fali uderzeniowej w falę dźwiękową, powodującą drgania litego podłoża w miejscu poddanym działaniu laserowej wiązki i również wystąpi zwielokrotnienie efektu czyszczenia powierzchni.

Po usunięciu zanieczyszczenia oryginalna powierzchnia jest już chroniona przed dalszym oddziaływaniem laserowym, ponieważ nie istnieje już granica ośrodków (faz). Kolejny impuls laserowej energii już nie wytwarza fali uderzeniowej, niewielka część jego energii promienistej jest pochłonięta przez czyste podłoże, zatem nie spowoduje jego uszkodzenia.

Jest oczywiste, że proces laserowej ablacji zachodzi pod warunkiem odpowiedniego doboru parametrów laserowej wiązki. Parametry te, to znaczy: czas trwania impulsu, maksymalną gęstość mocy i częstotliwość repetycji impulsów można zmieniać. Moc laserowego impulsu jest na tyle duża, aby w natychmiastowy, gwałtowny sposób wytworzyć szybki transport ciepła do cząstki zanieczyszczającego materiał, wymagany do eksplozyjnego odparowania cząstek lub cienkich warstw, oraz na tyle niska, aby nie przekroczyć progów uszko-

żenia warstwy wierzchniej samego podłoża. W wyniku gwałtownego odparowania, chwilowa wartość temperatury nie przekracza 600K, i również w sposób gwałtowny jej wielkość osiąga wartość temperatury otoczenia. Mała wartość średniej mocy termicznej (około 20W), pozwala uniknąć wszelkich niebezpiecznych efektów termicznych oraz pracować bez obaw na obiektach zarówno o podłożach metalowych, jak i delikatnych, kruchych takich jak: kamień, drewno, szkło, porcelana, kość słoniowa, tkanina itp.[1,3].



Rys.4. Fotografia obłoku laserowej plazmy  
Fig. 4. Photography of the laser ablative patch

### SOME INDICATORS OF THE LASER BEAM INTERACTION PHENOMENA WITH MATERIALS

**Summary:** The work presents some examinations of the laser beam interaction phenomena with building materials. The observed phenomena and assumed their physics parameters can be the indicators proposed in this paper.

### Literatura

- [1] Klemm P., Klemm A.J., Roźniakowski K., *Laserowe usuwanie zanieczyszczeń i modyfikacja warstwy wierzchniej*. w: *Fizyka Materiałów i Konstrukcji Budowlanych: Zastosowanie laserów w badaniach przemian fazowych*, red. Piotr Klemm. Monografia PŁ Łódź 2001r., str. 180.
- [2] Roźniakowski K., *Zastosowanie promieniowania laserowego w badaniach i modyfikacji właściwości materiałów budowlanych*. PAN, Warszawa-Łódź 2001.
- [3] Klemm K., Klemm P., Roźniakowski K., *Laserowo stymulowane domieszkowanie warstwy wierzchniej wybranych materiałów kapilarno-porowatych nanocząstkami trudno topliwych węglików metali*. *Fizyka Budowli – Ochrona Zabytków*. Politechnika Łódzka. Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych. Łódź 2009.
- [4] Klemm P., (red.) *Metoda wskaźnikowa oceny oddziaływania klimatu na obiekty zabytkowe*. *Fizyka Budowli – Ochrona Zabytków*. Politechnika Łódzka. Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych. Łódź 2009.